

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir



Research Article
Vol. 19, No. 5, Dec.-Jan. 2023, p. 577-591

Evaluation of the Importance of Multi-objective Particle Swarm Algorithm Parameters in Optimizing the Solutes Rejection of Camel Milk Ultrafiltration Using Partial Least Squares Regression

S.M.A. Razavi[1*], M. Kashaninejad[2]

1 and 2- Professor and Ph.D. Graduated Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: s.razavi@um.ac.ir)

Received / Revised / Accepted / Available Online	How to cite this article:
Received: 2021.03.28 Revised: 2021.07.02 Accepted: 2021.07.07 Available Online: 2021.09.15	Razavi, S.M.A., & Kashaninejad, M. (2023). Evaluation of the importance of multi-objective particle swarm algorithm parameters in optimizing the solutes rejection of camel milk ultrafiltration using partial least squares regression. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *19*(5), 577-591. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2021.69556.1028

Introduction

Ultrafiltration is one of the most common membrane processes in the dairy industry, especially for condensing and separating milk components. Using this process, several products can be produced, including milk concentrate used for cheese production, low-lactose dairy products, milk protein concentrate, and serum proteins for dietary supplements. The efficiency and cost of a membrane process depend on the percentage of rejection of the soluble components. Therefore, the use of concentrated milk made by ultrafiltration in the production of various dairy products depends on the efficiency of the membrane process and the changes in milk components during this process. On the one hand, the physicochemical properties of camel milk are different from those of cow milk, especially in terms of type and amount of protein. Because significant differences exist between the physicochemical properties of camel and cow milk, likely, the membrane processing conditions and the physicochemical properties of their products will be different completely. Although many studies have been conducted on the efficacy of the ultrafiltration processing of cow milk, there is no information about the efficacy of camel milk ultrafiltration, and most of the research done regarding optimizing is based on classical algorithms, Therefore, in this study, the effects of transmembrane pressure and temperature on the solutes rejection (protein, lactose, ash, and total solids) during camel milk ultrafiltration process were investigated, Then, these properties were optimized using particle swarm algorithm. Also, because the performance of the particle swarm algorithm is highly dependent on related parameters such as the number of iterations, the number of particles, accelerate constant, inertia weight, and velocity of the particles, so before optimization, the effect of these parameters on optimal responses were examined by partial least squares regression (PLS).

Materials and Methods

In this study, a pilot crossflow ultrafiltration system was used. A UF membrane (Model 3838 HFK-131, Koch membrane systems, Inc., USA) made of polysulfone amid (PSA) with MWCO of 20 kDa was applied. Camel milk was purchased from a local market in Mashhad and for camel skim milk production, its fat was separated by a pilot plant milk fat separator in the Food Research Complex, Ferdowsi University of Mashhad. The weight percentages of protein, fat, lactose, ash, and total solids of UF permeate samples were measured by ISO 8968-1:2014, ISO 1211: 2010, ISO 26462/IDF 214:2010, ISO 5544:2008, and ISO 6731:2010 at two replications, respectively. the process treatments were performed in the form of a central composite design (CCD) (5 replications at the central point) for two independent variables at three levels so that the total number of 13 treatments was obtained. The data were modeled using the statistical

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2021.69556.1028

software of Design Expert (version 11) based on the response surface methodology and each of the response variables in the form of a regression model was presented as a function of independent variables.

Results and Discussion

The rejection of total solids and protein of the tested samples varied in the range of 45.4-51.03% and 94.09-97.51%, respectively. It means that in each TMP and T, more than 45% of the total solids and 94% of the protein of camel milk were kept by the membrane. The results also showed that none of the linear, quadratic and interactive effects of TMP and T on the total solids and protein rejections were not significant. According to the results, the R_L reduced with increasing T. Increasing the TMP also led to a reduction at high T and an increase in R_L rate of the samples at lover T. Also, the effect of TMP on R_A showed a non-linear trend, so that TMP at high T led to an increase, and at low T, it led to a reduction in the R_A of the samples.

Conclusion

The optimization results with the particle swarm algorithm showed that this algorithm has a high convergence speed and by recognizing and analyzing its parameters, the optimal conditions can be easily found. The optimum ultrafiltration conditions in this study with the lowest R_L and R_A were determined as 80 kPa TMP and 29.85°C T.

Keywords: Camel milk, Partial least squares regression, Particle swarm algorithm, Solute rejection, Ultrafiltration


نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir


مقاله پژوهشی

جلد ۱۹، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲ ص. ۵۹۱-۵۷۷

بررسی اهمیت پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه در بهینه‌یابی درصد دفع اجزاء محلول اولترافیلتراسیون شیر شتر با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی

سید محمد علی رضوی[1]*- مرتضی کاشانی‌نژاد[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶

چکیده

در این تحقیق، با توجه به اهمیت شیر شتر و ویژگی‌های عملکردی و غذایی خاص پروتئین‌های آن در فرآیند تولید کنسانتره پروتئین شیر، ابتدا اثر اختلاف فشار در عرض غشاء (۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلو پاسکال) و دمای فرآیند (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) بر درصد دفع اجزاء محلول شیر شتر (پروتئین، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر توسط روش مرکب مرکزی مدلسازی شد و سپس مدل‌های معنی‌دار توسط الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه پس از بررسی اهمیت پارامترهای الگوریتم بهینه‌یابی شدند. نتایج نشان داد که افزایش اختلاف فشار منجر به افزایش معنی‌دار درصد دفع املاح و افزایش دمای اولترافیلتراسیون منجر به افزایش معنی‌دار درصد دفع لاکتوز و درصد دفع املاح شد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که هیچکدام از اثرات خطی، درجه دوم و متقابل اختلاف فشار و دما بر درصد دفع مواد جامد کل و پروتئین نمونه‌ها معنی‌دار نبودند. نتایج ضرایب استاندارد شده برای متغیرهای وابسته (درصد دفع لاکتوز (R_l) و املاح (R_a))، مدت زمان اجرا الگوریتم (CPU time) و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی (NFE) با متغیرهای مستقل (تعداد تکرار (Number of Iterations)، تعداد ذرات (Number of particles)، ضریب اینرسی (W1)، ضریب یادگیری شخصی (C1) و ضریب یادگیری کلی (C2)) در رگرسیون PLS نیز نشان داد که تعداد ذرات در همه پاسخ‌های مورد بررسی دارای بالاترین اهمیت بود و ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری کلی اهمیت چندانی بر مدت زمان اجرای الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی نداشتند. به منظور بهینه‌یابی در این تحقیق نیز درصد دفع لاکتوز و درصد دفع املاح حداقل در نظر گرفته شدند که با توجه به صفات مذکور، اختلاف فشار و دمای بهینه به‌ترتیب ۸۰ کیلو پاسکال و ۲۹/۸۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. در چنین فرآیندی دفع لاکتوز ۱۳/۳۸ درصد و دفع املاح ۱۸/۷۰ درصد بود. همچنین مدت زمان اجرای الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی در این بهینه‌یابی نیز ۰/۱۴۳ ثانیه و ۱۰۰۰ بودند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات، درصد دفع اجزاء محلول، رگرسیون حداقل مربعات جزئی، شیر شتر، فیلتراسیون

مقدمه

اولترافیلتراسیون از متداول‌ترین فرآیندهای غشایی در صنایع لبنی به‌ویژه برای تغلیظ و جداسازی اجزای شیر است. با استفاده از این فرآیند می‌توان محصولات متعددی از جمله شیر مورد استفاده برای پنیر، فرآورده‌های لبنی با لاکتوز پایین، کنسانتره پروتئینی شیر و پروتئین های سرمی برای مکمل‌های غذایی تولید کرد (Ng *et al.*, 2017). بنابراین استفاده از این فرایند در تولید محصولات متنوع به‌ویژه برای شیر شتر به‌عنوان یکی از منابع مهم تولید شیر، به دلیل افزایش جمعیت و کاهش تولید سرانه مواد غذایی در کشورهای در حال توسعه، بسیار حائز اهمیت است (Benmechernene *et al.*, 2014). از طرفی مهمترین محدودیت کاربرد عملی فرآیندهای اولترافیلتراسیون کاهش کارایی غشاء به دلیل پدیده‌های پلاریزاسیون غلظت و گرفتگی است، زیرا در چند دقیقه اول فرآیند، موجب کاهش شدید شار جریان تراوه، توسعه گرفتگی و تغییر میزان دفع اجزاء محلول می‌شوند که در نهایت منجر به تغییرات اساسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی محصول نهایی

۱ و ۲- به‌ترتیب استاد و دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: s.razavi@um.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2021.69556.1028

می‌گردند (Rao, 2002). بنابراین تعیین دقیق شرایط عوامل مؤثر بر فرایند اولترافیلتراسیون از جمله عوامل هیدرودینامیکی یعنی اختلاف فشار و دما در تولید یک محصول با کیفیت و مقرون به صرفه اهمیت فراوانی دارد. در مورد کارایی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر گاو تحقیقات فراوانی شده است (Grandison *et al*., 2000; Razavi *et al*., 2017; Wang and Chung, 2005; Luo *et al*., 2015) اما در مورد درصد دفع اجزاء محلول شیر شتر اطلاعات بسیار کمی وجود دارد. مهایا و همکاران (Mehaia *et al*., 1996) تغییرات غلظت پروتئین، چربی، لاکتوز، مواد جامد کل و املاح شیر شتر در طول فرآیند تغلیظ توسط اولترافیلتراسیون را مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که ۱۰۰ درصد نیتروژن پروتئینی و چربی، حدود ۱۳ درصد نیتروژن غیر پروتئینی و ۱ درصد لاکتوز شیر شتر در طول فرآیند تغلیظ توسط غشاء دفع شدند. همچنین برخی محققین شیر شتر را توسط فرآیند اولترافیلتراسیون تغلیظ کرده‌اند و محصولاتی نظیر پنیر و ایزوله پروتئینی شیر شتر را تولید کرده‌اند اما کارایی غشاء و درصد دفع اجزاء محلول اولترافیلتراسیون آن را بررسی نکرده‌اند (Hassl *et al*., 2011; Mehaia, 1996).

از طرفی اغلب مسائل بهینه‌یابی در مهندسی علاوه بر غیر خطی بودن دارای محدودیت‌های زیادی هستند. بنابراین یافتن راه حل‌های بهینه برای اینگونه مسائل غیر خطی نیازمند الگوریتم‌های بهینه‌یابی موثر و کارا می‌باشد. بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری مدرن بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفتن از طبیعت گسترش یافته‌اند و امروزه این الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته با توجه به قدرت و کارایی‌شان در کاربردهای مختلف توسعه یافته‌اند. الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات[1] نیز یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌یابی هوشمند است که در حوزه هوش ازدحامی[2] جای می‌گیرد. این الگوریتم، توسط جیمز کندی و راسل سی ابرهارت در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید، و با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی چون ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌هایی کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده است. در الگوریتم ازدحام ذرات، اعضای جمعیت جواب‌ها، به صورت مستقیم با هم ارتباط دارند و از طریق تبادل اطلاعات با یکدیگر و یادآوری خاطرات خوب گذشته، به حل مساله می‌پردازند. الگوریتم ازدحام ذرات برای انواع مسائل پیوسته و گسسته مناسب است و پاسخ‌های بسیار مناسبی برای مسائل بهینه‌یابی مختلف داده است (Yang, 2010). اگرچه الگوریتم ازدحام ذرات یک روش بسیار سریع است که برای مسائل نه چندان پیچیده و با بعد کم که احتمال دچار شدن آنها در بهینه محلی کم است، مطلوب می‌باشد، ولی در مسائل با بعد بالاتر و پیچیده‌تر که دارای نقاط بهینه محلی زیادی می‌باشند همگرایی سریع می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که ذرات جمعیت در یک نقطه بهینه محلی متوقف شده‌اند که به این پدیده همگرایی زودرس نیز گفته می‌شود (Shi and Eberhart, 1998). در این میان شناخت رفتار پارامترهای این الگوریتم و تعیین مقادیر دقیق آنها با توجه به مسئله مورد نظر می‌تواند نقش بسزایی در کاهش یا افزایش سرعت همگرایی و گریز از بهینه‌های محلی را در پی داشته باشد. در بسیاری از مطالعات مختلف، پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات به صورت تجربی و یا با استفاده از تجربیات مطالعات پیشین تعیین شده‌اند (Eberhart, Shi, and Kennedy, 2001)، اما بدیهی است که پارامترهای الگوریتم به شدت وابسته به نوع تابع هدف می‌باشد و شناخت اثر هر یک از آنها بر اساس شرایط مسئله بسیار حائز اهمیت است.

تاکنون تحقیقات چندانی در خصوص تاثیر عوامل هیدرودینامیکی بر درصد دفع اجزاء محلول شیر شتر در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر صورت نگرفته است و اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌یابی فرآیند اولترافیلتراسیون بر مبنای الگوریتم‌های کلاسیک بوده است، لذا در این پژوهش، اثر اختلاف فشار در عرض غشاء (۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلوپاسکال) و دمای فرآیند (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) بر درصد دفع اجزاء محلول شیر شتر (پروتئین، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر مدلسازی شد و مدل‌های معنی دار توسط الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه بهینه‌یابی شدند. چون عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات به شدت وابسته به پارامترهای مرتبط با آن از جمله تعداد تکرار[3]، تعداد ذرات[4]، ضریب اینرسی، ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری کلی است، لذا قبل از بهینه‌یابی، اثر این پارامترها بر پاسخ‌های بهینه (درصد دفع لاکتوز و املاح)، مدت زمان اجرای الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی، توسط رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

سیستم غشایی و نحوه عملیات

در این تحقیق از یک سیستم اولترافیلتراسیون غشایی جریان عرضی پایلوتی استفاده شد. غشاء مورد استفاده نیز مدل HFK-3838 131 و ساخت شرکت کوچ آمریکا (Koch membrane Com., USA) از جنس پلی سولفون آمید با اندازه منافذ (MWCO) ۲۰ کیلودالتون بود. سیستم اولترافیلتراسیون مورد استفاده مجهز به تانک خوراک، پمپ سانتریفوژی، دبی‌سنج، مدول اولترافیلتراسیون از نوع مارپیچ حلزونی، مبدل حرارتی لوله‌ای، دو فشار سنج عقربه‌ای، دو شیر

1- Particle Swarm optimization (PSO)
2- Swarm Intelligence
3- Number of Iterations
4- Number of particles

جریان و یک دماسنج دیجیتالی بود. برای جلوگیری از تغییرات دما در طی عملیات، دمای جریان توسط مبدل حرارتی لوله‌ای در حد مورد نظر تنظیم می‌گردید. شیر شتر تهیه شده از بازار محلی مشهد خریداری شد و چربی آن در مجتمع آموزشی- تحقیقاتی صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد پس از پیش گرم شدن (۳۷ درجه سانتی‌گراد) توسط سپراتور جدا شد.

آزمایشات

درصد وزنی پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک بدون چربی نمونه‌های شیر شتر پس چرخ و تراوه به‌ترتیب به روش های (ISO 8968-1,2014)، (ISO 8968-1,2014)، (ISO 8968-1,2014)، (ISO 8968-1,2014) و (ISO 8968-1,2014) در دو تکرار اندازه‌گیری شدند. آنالیز شیمیایی شیر شتر پس چرخ نشان داد که نمونه‌ها دارای ۰/۶ درصد چربی، ۳/۲۲ درصد پروتئین، ۳/۵۶ درصد لاکتوز، ۰/۹۰ درصد املاح و ۸/۲۵ درصد مواد جامد کل و ۱۳۶۱ میلی گرم در لیتر پتاسیم و ۱۱۷۶ میلی‌گرم در لیتر کلسیم، ۶۵۶ میلی‌گرم در لیتر فسفر، ۶۴۵ میلی‌گرم در لیتر سدیم، ۷۷ میلی‌گرم در لیتر منیزیم و ۶/۵ میلی‌گرم در لیتر آلومینیوم، ۴/۵۵ میلی‌گرم در لیتر روی ۰/۳۵میلی گرم در لیتر آهن، ۴/۵۵ میلی‌گرم در لیتر روی، ۰/۰۴ میلی‌گرم در لیتر منگنز و pH برابر ۶/۲ بودند.

درصد دفع ظاهری اجزاء محلول (پروتئین، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک کل) در طی عملیات اولترافیلتراسیون نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۱):

$$Rabs = 1 - \frac{Cp}{Cb}$$

که در آن Cp غلظت جزء محلول در تراوه و Cb غلظت جزء محلول در خوراک (یا ناتراوه) است.

مدلسازی و آنالیز آماری

در این پژوهش، تیمارهای فرآیند به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح مرکب مرکزی (CCD) (۵ تکرار در نقطه مرکزی) برای دو متغیر مستقل (دما و اختلاف فشار) و در سه سطح انجام شد به‌صورتی که تعداد کل ۱۳ تیمار (مطابق جدول ۱) به دست آمد (Montgomery, 2017). نتایج پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری دیزاین-اکسپرت (Design-Expert version 10) به روش سطح پاسخ[1] مدلسازی شد و هر یک از متغیرهای پاسخ (درصد دفع لاکتوز و املاح) در قالب مدل رگرسیون چند جمله‌ای زیر به صورت تابعی از متغیرهای مستقل ارائه شدند:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} x_i x_j \quad (۱)$$

که در آن Y عبارت است از متغیر تابع یا پاسخ، x_i سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل (اختلاف فشار در عرض غشاء (کیلوپاسکال) و دما (درجه سانتی‌گراد)) و x_i^2 و x_ix_j اثرات درجه دوم و ضرایب اثرات متقابل می‌باشند. با استفاده از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) معنی‌دار بودن اثرات خطی، درجه دوم و متقابل ضرایب مدل رگرسیون برای هر پاسخ در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ بررسی گردید (Saltelli, 2002).

بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

در الگوریتم ازدحام ذرات، تعدادی از موجودات که به آن‌ها ذره گفته می‌شود در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه کردن مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی آن و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک ذره از بهترین ذرات موجود درجمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آنکه جواب مورد نظر به دست آید. در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله t+1 ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارتند از:

$$V_{t+1} = WV_t + C_1 r_1 \left(x_{i,best_t} - x_t\right) + C_2 r_2 \left(x_{gbest_t} - x_t\right) \quad (۱)$$

$$x_{t+1} = x_t + V_{t+1} \quad (۲)$$

در این روابط w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه [۱ و ۰] و همچنین c_1 و c_2 ضرایب یادگیری هستند. r_1 و r_2 باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها بوجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. ضریب یادگیری c_1 مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد (Yang, 2010).

1- Response surface methodology

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل طرح مرکب مرکزی فرآیند اولترافیلتراسیون نمونه‌های شیر شتر

Table 1- The levels of independent variables of the central composite design of the ultrafiltration process of camel milk samples

تیمار Treatment	اختلاف فشار در عرض غشاء Transmembrane Pressure (kPa)	دما Temperature (°C)
1	80	40
2	120	30
3	120	20
4	80	30
5	120	30
6	160	40
7	120	30
8	160	20
9	120	40
10	160	30
12	80	20
13	120	30
14	120	30

رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)

یکی از ابزارهای مهم برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته از روی متغیرهای مستقل، استفاده از معادلات رگرسیون می‌باشد. وجود برخی از معایب همچون وجود هم خطی[1] (در نظر گرفتن یک متغیر به صورت ترکیب خطی از دیگر متغیرها) بین متغیرهای مستقل در برخی از مطالعات باعث نامعتبر شدن مطالعات رگرسیونی (حداقل مربعات عمومی) شده است. از این رو محققان روش‌های جدیدی برای بنا کردن معادله پیش‌بینی ارائه داده‌اند که روش رگرسیونی موسوم به کمترین مربعات جزئی از مهمترین این معادلات می‌باشد. دراین روش مؤلفه‌های جدید متعامدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، ایجاد شده، سپس از این مؤلفه‌ها برای ساختن معادله رگرسیونی استفاده می‌شود. در مدل رگرسیون PLS ضرایب استاندارد VIP(Variable Importance in Projection) منعکس‌کننده اثر تک تک x ها بر روی y ها می‌باشد و به آسانی در نمودار PLS قابل مشاهده است و به این ترتیب مؤثرترین متغیرها و درجه اهمیت آنها به سرعت شناسایی و تشخیص داده می‌شوند (Tenenhaus *et al.*, 2005). در این پژوهش با استفاده از رگرسیون کمترین مربعات جزئی و به کمک نرم‌افزار Minitab 18، درجه اهمیت متغیرهای (x) (پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات) ها بر روی y ها (درصد دفع لاکتوز و املاح، مدت زمان اجرا الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی) بررسی شد.

نتایج و بحث

تعیین مدل‌های مناسب

مدل‌های تجربی به‌دست آمده برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته با استفاده از روش سطح پاسخ برای متغیرهای معنی‌دار در جدول ۲ آورده شد. برای بررسی صحت مدل از ضریب تبیین (R^2) و آزمون عدم برازش[2] استفاده گردید. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است ضریب تبیین برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده بالاتر از ۰/۷ بوده و فاکتور عدم برازش نیز برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین بالا بودن نسبی ضریب تبیین و معنی‌دار نبودن عدم برازش برای تمامی پاسخ‌ها صحت مدل را برای برازش اطلاعات تأیید می‌کند (Montgomery, 2017). برای مشاهده بهتر اثر متغیرهای مستقل روی صفات مورد آزمایش، نمودارهای سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته رسم گردید.

درصد دفع مواد جامد کل شیر و پروتئین

درصد دفع مواد جامد کل شیر و پروتئین نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین ۴۵/۴ تا ۵۱/۰۳ و ۹۴/۰۹ تا ۹۷/۵۱ درصد متغیر بودند. نتایج آنالیزها نشان داد که هیچ کدام از اثرات خطی، درجه دوم و متقابل اختلاف فشار و دما بر درصد دفع مواد جامد کل شیر و پروتئین نمونه ها معنی‌دار نبودند ($P>0.05$). همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش برای اتمام فرآیند اولترافیلتراسیون، مواد جامد کل ناتراوه یکسان در نظر گرفته شد، ملاحظه گردید که تیمارهایی که اختلاف فشار بالاتری

1- Collinearity

2- Lack of fit

داشتند در زمان کمتری به مواد جامد کل ناتراوه مد نظر رسیدند. با توجه به نتایج این تحقیق مشخص گردید که در هر اختلاف فشار و دمایی بیش از ۴۵ درصد مواد جامد کل شیر و ۹۴ درصد پروتئین شیر شتر توسط غشاء باز نگهداشته شده‌اند.

جدول ۲- مدل‌های تجربی به دست آمده با استفاده از روش مرکب مرکزی برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر

Table 2- Experimental models obtained using the central composite method for predicting the dependent variables of the camel milk ultrafiltration process

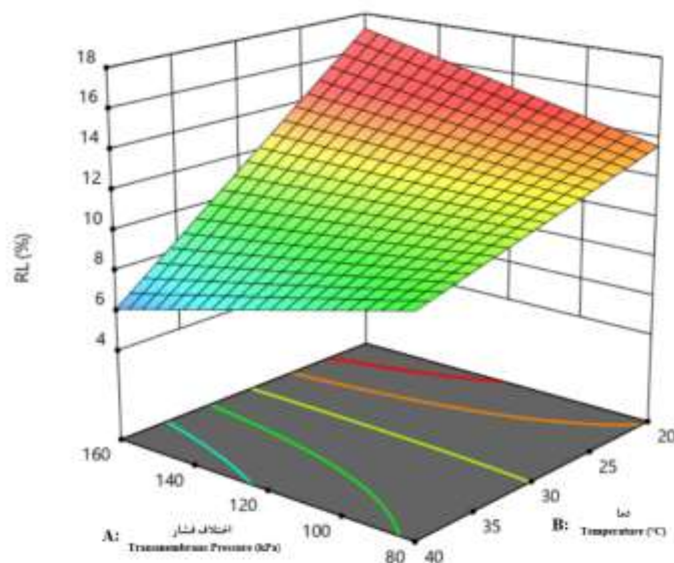
متغیر های وابسته Dependent variables	معادله Eq	F Value	p-value Prob > F	ضریب تبیین Coefficient of determination	ضریب تغییرات Coefficient of variation	عدم برازش Lack of fit
درصد دفع لاکتوز Lactose rejection	Y_1 =6.20 + 0.13A + 0.19B - 0.004AB	6.95	0.0028	0.74	15	n.s
درصد دفع املاح Ash rejection	$Y_2 = 105.83 + 0.96A - 8.92B - 0.022AB - 0.001A^2 + 0.181B^2$	0.18	0.0001	0.99	0.01	n.s

مهایا و همکاران (Mehaia *et al*., 1996) تغییرات غلظت پروتئین، چربی، لاکتوز، مواد جامد کل و املاح شیر شتر در طول فرآیند تغلیظ توسط اولترافیلتراسیون را مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که ۱۰۰ درصد نیتروژن پروتئینی و چربی، حدود ۱۳ درصد نیتروژن غیر پروتئینی و ۱ درصد لاکتوز شیر شتر در طول فرآیند تغلیظ توسط غشاء اولترافیلتراسیون دفع شدند. کائوتک، نابتنی و ماتسونو (Kautake, Nabetani, and Matsuno, 1986) بیان نمود که دما اثر معنی‌داری بر درصد دفع چربی و پروتئین شیر گاو در فرآیند اولترافیلتراسیون نداشت.

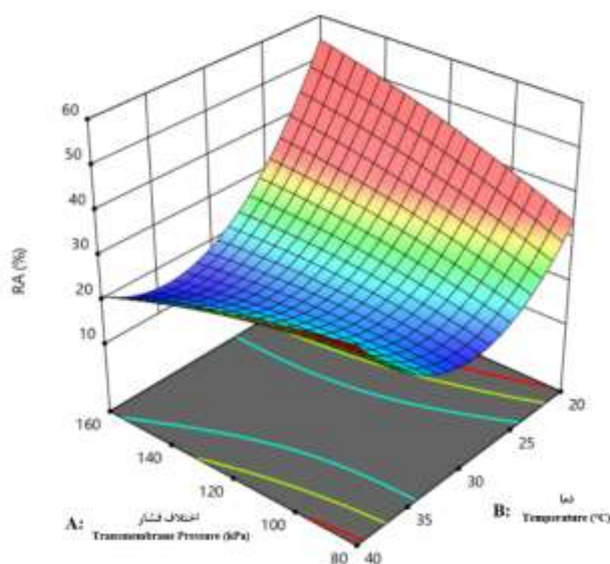
درصد دفع لاکتوز و املاح

درصد دفع لاکتوز و املاح نمونه‌های مورد آزمون به‌ترتیب بین ۴/۹۹ تا ۱۴/۷۳ و ۱۷/۴۸ تا ۳۴/۰۷ درصد متغیر بودند. رضوی، موسوی و مرتضوی (Razavi, Mousavi, and Mortazavi, 2003) نیز بیان کرد در فرآیند اولترافیلتراسیون شیر گاو به طور متوسط در حدود ۱۵ درصد لاکتوز و ۴۵ درصد املاح از توسط غشاء باز داشته شده‌اند. مدل چند جمله‌ای درجه دو y_4 نشان داد که فقط اثر خطی دما در سطح ۹۹ درصد بر درصد دفع لاکتوز معنی‌دار بود و اختلاف فشار هیچگونه اثر معنی‌داری بر درصد دفع لاکتوز نمونه‌ها نداشت. همچنین مدل چند جمله‌ای درجه دو y_5 نیز نشان داد که اثرات خطی دما و اختلاف فشار و اثر متقابل دما- اختلاف فشار در سطح ۹۹ درصد بر درصد دفع املاح معنی‌دار بود. شکل‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب تأثیر اختلاف فشار و دما را بر درصد دفع لاکتوز و املاح نمونه‌ها را با توجه به ضرایب مدل‌های y_4 و y_5 نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۱ می‌توان دریافت با افزایش دمای اولترافیلتراسیون درصد دفع لاکتوز نمونه‌ها کاهش می‌یابد. اما افزایش اختلاف فشار در دماهای پایین منجر به افزایش و در دماهای بالا منجر به کاهش درصد دفع لاکتوز نمونه‌ها شد. شکل ۲ نیز نشان می‌دهد با افزایش دمای اولترافیلتراسیون از ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، درصد دفع املاح نمونه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر دما (۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، تاثیر ناچیزی بر افزایش درصد دفع املاح نمونه‌ها داشت. همچنین اثر اختلاف فشار بر درصد دفع املاح روند غیر خطی دارد به‌طوری‌که افزایش اختلاف فشار در دماهای بالا منجر به کاهش و در دماهای پایین منجر به افزایش درصد دفع املاح نمونه گردید. رضوی و همکاران (Razavi *et al*., 2003) نیز بیان کردند که افزایش اختلاف فشار، بطور جزئی درصد دفع لاکتوز و املاح را افزایش می‌دهد. ثابت شده است که لایه مسیلی متشکل از مسیل های کازئین به عنوان یک غشاء دینامیک عمل می‌کند که اندازه حفرات آن برابر اندازه حفرات غشاء است (Krstić *et al*., 2002). لذا با افزایش فشار، سرعت مهاجرت ترکیبات در اثر جریان همرفتی شار تراوه به طرف سطح غشاء زیادتر می‌شود و بنابراین جذب و رسوب اجزاء محلول به لایه میسلی سطح غشاء بیشتر گردیده و در نتیجه اندازه مؤثر حفرات کاهش می‌یابد. به همین دلیل درصد دفع اجزای محلول با افزایش اختلاف فشار افزایش می‌یابد. لیمساوات و پروکساسری (Limsawat and Pruksasri, 2010) نیز نشان دادند که افزایش اختلاف فشار فرآیند اولترافیلتراسیون منجر به کاهش درصد دفع لاکتوز شیر UHT کم چرب شد.



شکل ۱- تأثیر اختلاف فشار و دما بر درصد دفع لاکتوز در فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر
Fig. 1- The effect of temperature and transmembrane pressure on lactose rejection of camel milk ultrafiltration



شکل ۲- تأثیر اختلاف فشار و دما بر درصد دفع املاح در فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر
Fig. 2- The effect of temperature and transmembrane pressure on ash rejection of camel milk ultrafiltration

به نظر می‌رسد علت کاهش درصد دفع لاکتوز و املاح با افزایش دمای اولترافیلتراسیون، بزرگتر شدن ضریب نفوذ آنها با افزایش دما باشد. همچنین از انجایی که افزایش دما منجر به کاهش مقاومت گرفتگی برگشت‌ناپذیر می‌شود می‌توان بیان کرد که افزایش گرفتگی برگشت‌ناپذیر با دما بستگی به درصد دفع اجزاء محلول شیر ندارد، بلکه احتمالا امکان تشکیل پیوندهای قوی‌تر بین مولکول‌ها در لایه مجاور سطح غشا و نیز مولکول‌ها با غشاء و در نتیجه جذب سطحی شدیدتر باشد. پومپئی، ریزمینی و پری (Pompei, Resmini, and Peri, 1973) نتیجه گرفت در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد میزان بازداری اجزاء محلول نسبت به ۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است. اکنر و زاتولا (Eckner and Zottola, 1992) عنوان نمود که دماهای پایین‌تر بازداری ترکیبات شیر (لاکتوز و املاح) را بهبود می‌بخشد.

بررسی اهمیت پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

در این پژوهش به منظور بهینه‌یابی کارایی اولترافیلتراسیون برای تولید محصولات پروتئینی تغلیظ شده از شیر شتر تلاش بر این بود که درصد دفع لاکتوز و املاح به عنوان توابع هدف کاهش یابند. داده‌های اولیه داده شده به الگوریتم ازدحام ذرات در حقیقت داده‌های مدل‌های پیش‌بینی شده از طرح مرکب مرکزی (جدول ۲) هستند. اما از آنجایی که عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات به شدت وابسته به پارامترهای مرتبط با آن از جمله تعداد تکرار (Ni)، تعداد ذرات (Np)، ضریب اینرسی (W1)، ضریب یادگیری شخصی (C1) و ضریب یادگیری کلی (C2) است لذا لازم است ابتدا اثر این پارامترها بر توابع هدف اولیه مورد ارزیابی قرار گیرند. لذا در این پژوهش نیز قبل از بهینه‌یابی نهایی توابع هدف، برای مشخص نمودن ضریب اهمیت و تأثیر پارامترهای الگوریتم، ابتدا پارامترهای الگوریتم به عنوان تیمارهای فرآیند به روش کاملاً تصادفی برای پنج متغیر مستقل و در پنج سطح (مطابق جدول ۳) اجرا و پاسخ‌های بهینه (درصد دفع لاکتوز و املاح)، مدت زمان اجرای الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی (NFE) توسط رگرسیون PLS مورد بررسی قرار گرفتند.

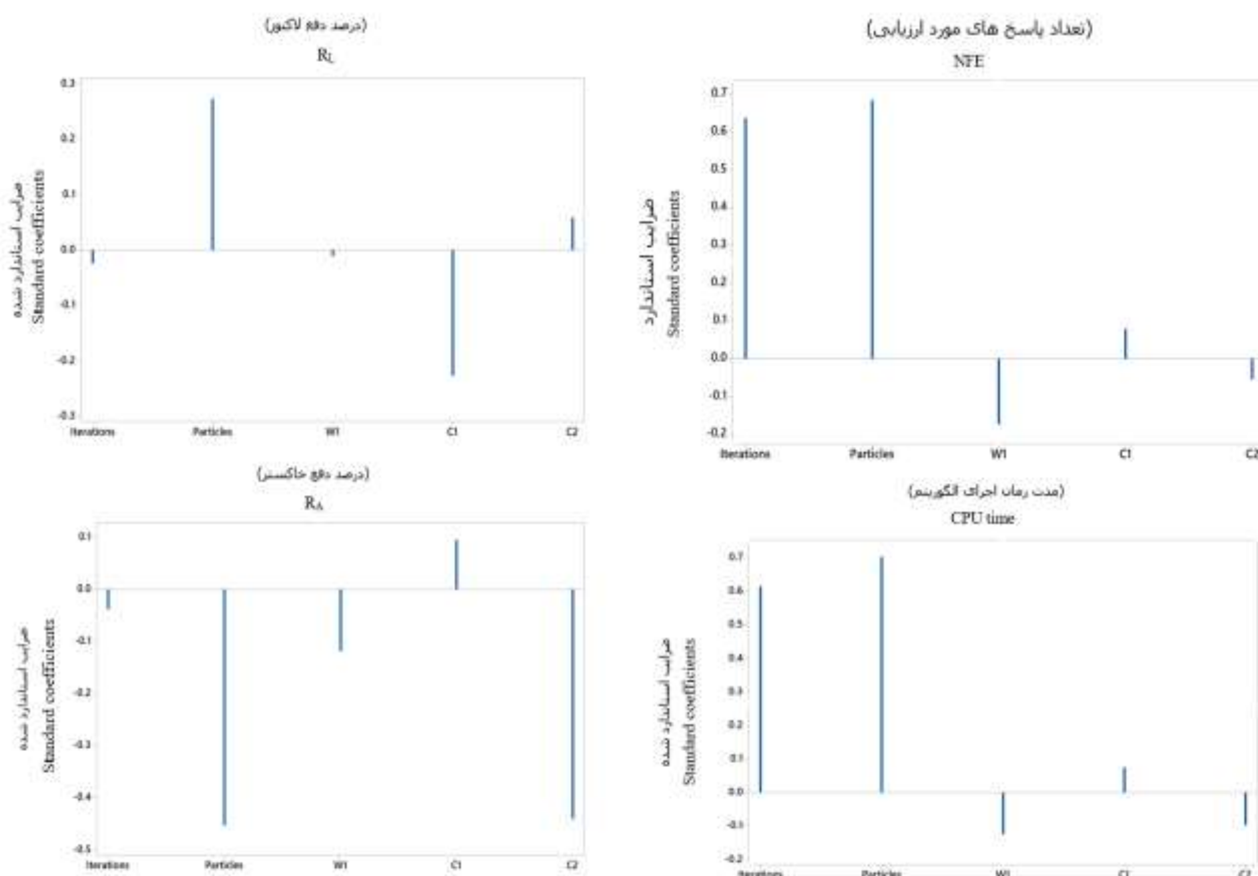
شکل ۳ نمودار ضرایب استاندارد شده برای متغیرهای وابسته (درصد دفع لاکتوز و املاح)، مدت زمان اجرا الگوریتم و تعداد پاسخ های مورد ارزیابی) را با تک تک متغیرهای مستقل (تعداد تکرار، تعداد ذرات، ضریب اینرسی، ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری کلی در رگرسیون PLS نشان می‌دهد. در این اشکال هر چه فاصله اثر به عدد یک نزدیک‌تر و یا بیشتر باشد اهمیت بالاتری پیدا می‌کنند.

تعداد تکرار و ذرات

مطابق شکل ۳، تعداد تکرار در مدت زمان اجرای الگوریتم و تعداد پاسخ مورد ارزیابی از اهمیت نسبتاً بالایی برخوردار هستند. اصولا تعداد تکرار در رسیدن به جواب مناسب به شدت به نوع مسئله وابسته است (Juneja and Nagar, 2016). تکرارهای کم ممکن است فرایند جستجو را بی‌نتیجه خاتمه دهد. همچنین تعداد تکرارهای زیاد نیز می تواند منجر به افزایش غیر ضروری پیچیدگی محاسباتی و نهایتا افزایش زمان اجرای الگوریتم گردد. همچنین همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد تعداد ذرات در همه پاسخ‌های مورد بررسی دارای بالاترین اهمیت است که این اهمیت در درصد دفع لاکتوز مثبت (+۰/۸۲) و در درصد دفع املاح منفی (−۰/۴۸) است.

جدول ۳- سطوح متغیرهای پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات
Table 3- Variable levels of particle swarm algorithm parameters

نام متغیر Variable name	سطوح متغیر Variable levels				
تعداد تکرار Number of iterations (Ni)	100	75	50	25	5
تعداد ذرات Number of particles (Np)	100	75	50	25	5
ضریب اینرسی Coefficient of inertia (W1)	2	1.5	1	0.5	0
ضریب یادگیری شخصی Personal learning factor (C1)	4	3	2	1	0
ضریب یادگیری کلی Social learning factor (C2)	4	3	2	1	0



شکل ۳- ضریب اهمیت تخمین زده شده بوسیله رگرسیون PLS بین متغیرهای مستقل با متغیرهای وابسته

Fig. 3- The coefficient of importance estimated by PLS regression between independent and dependent variables

هر چه تعداد ذرات در گروه بیشتر باشد تنوع جواب اولیه نیز بیشتر خواهد بود. یک گروه بزرگ به قسمت‌های بیشتری از فضای جست وجو اجازه می‌دهد تا در هر تکرار پوشش داده شوند، اگر چه تعداد بیشتر ذرات، محاسبات را پیچیده‌تر می‌کند و منجر به افزایش زمان اجرای الگوریتم می‌شود. در بعضی موارد تعداد ذرات بیشتر، تعداد تکرارها را برای رسیدن به جواب بهینه کم می‌کند. برگ و انگلبرت (Bergh and Engelbrecht, 2001) در مطالعه خود نشان دادند که حضور بین ۱۰ تا ۳۰ ذره در الگوریتم ازدحام ذرات جهت تعیین مقدار بهینه تابع مورد هدفشان مناسب بود.

ضریب اینرسی (W1)

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد ضریب اینرسی در همه پاسخ‌های مورد بررسی دارای اهمیت چندان زیادی نیست که البته این اهمیت در درصد دفع املاح (۰/۱۲-) بیشتر از درصد دفع لاکتوز (۰/۰۱-) است. ضریب اینرسی بر روی همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات تاثیر مستقیم دارد. در واقع می‌توان به واسطه ضریب اینرسی، تأثیر سرعت‌های گذشته را بر سرعت‌های زمان حال کنترل کرد. می‌توان برای برقراری موازنه بهتر میان جست وجوی سراسری و جست وجوی محلی، مقدار ضریب اینرسی را تغییر داد. مقدار زیاد ضریب اینرسی باعث می‌شود ذرات موجود در الگوریتم، به جست وجوی مناطق جدیدتر روی آورند و یک جست‌وجوی سراسری را انجام دهند. در مقابل، مقدار کم ضریب اینرسی باعث می‌شود ذرات در منطقه محدودی بمانند و در واقع جست وجوی محلی انجام دهند. جست‌وجوی محلی برای دقیق‌تر کردن جواب‌های فعلی مناسب است و جست‌وجوی سراسری برای یافتن جواب‌های بهتری که احتمالا در جاهای ناشناخته از فضای جست وجو وجود دارند، به کار می‌رود (Kennedy and Eberhart, 1995). اولاریو و زومایا (Olariu and Zomaya, 2005) و پلی، کندی و بلک ول (Poli, Kennedy, and Blackwell, 2007) بیان کردند که مقدار مناسب برای ضریب اینرسی، باعث ایجاد تعادل بین جست‌وجوی‌های محلی و سراسری می‌شود و در بیشتر مواقع تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی به یک جواب مناسب را کاهش می‌دهد. برگ و انگلبرت (Bergh and Engelbrecht, 2001) نیز بیان کردند که بهتر است

مقدار ضریب اینرسی در مراحل ابتدایی، یک مقدار بزرگ درنظر گرفته شود تا یک جست‌وجوی کامل و سراسری از فضای جست‌وجو صورت گیرد، سپس در طی مراحل اجرای الگوریتم، مقدار ضریب اینرسی به تدریج کاهش داده می‌شود تا الگوریتم به مرز هم‌گرایی نزدیک شود و جواب‌های دقیق‌تری به دست دهد. ابرهارت، شی و کندی (Eberhart, Shi, and Kennedy, 2001) نیز نشان دادند که انتخاب ضریب اینرسی به صورت یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۱–۰/۵) نیز نتایج خوبی را در بهینه‌یابی توابع هدف داشته است.

ضریب یادگیری شخصی (C1) و ضریب یادگیری کلی (C2)

مطابق شکل ۳، ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری کلی در درصد دفع لاکتوز و در درصد دفع املاح از اهمیت نسبتاً بالایی برخوردار هستند که البته ضریب یادگیری شخصی در دفع لاکتوز و ضریب یادگیری کلی در درصد دفع املاح از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. همچنین این ضرایب اهمیت چندانی بر مدت زمان اجرای الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی ندارند. کندی (Kennedy, 1999) ضمن تحقیقات خود دریافت که برای ذرات تک بعدی که به صورت غیر تصادفی حرکت می‌کنند، اگر مقدار C1 +C2 بین صفر و ۴ باشد، مسیرهایی که ذرات طی می‌کنند پذیرفتنی‌تر است. پلی، کندی و بلک‌ول (Poli, Kennedy, and Blackwell, 2007) و ابرهات، شی و کندی (Eberhart, Shi, and Kennedy, 2001) نیز با تحلیل‌هایی که روی سیستم حرکت ذرات انجام دادند، راهبردی برای تعیین ضرایب یادگیری شخصی و کلی ایجاد کردند و ادعا داشتند این راهبرد از ناپایدار شدن سیستم حرکتی ذرات جلوگیری می‌کند، هم‌گرایی ذرات را تضمین می‌کند و نیازی به تعریف پارامترها ندارد. کلرک و کندی (Clerc and Kennedy, 2002) نیز روابط زیر را برای تعیین ضرایب یادگیری و اینرسی پیشنهاد دادند:

$$W1 = X \quad (۱)$$

$$C1 = X\varphi_1 \quad (۲)$$

$$C2 = X\varphi_2 \quad (۳)$$

که در این روابط φ1 و φ1 اعدادی مثبت هستند و به نوی انتخاب می‌شوند که $\varphi=\varphi1+\varphi2\geq4$ باشد. X نیز از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$X = \frac{2}{\varphi-2+\sqrt{\varphi2-4\varphi}} \quad (۴)$$

البته امروزه در بیشتر تحقیقات انجام شده ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری کلی ۲ در نظر گرفته شده‌اند که نتایج رضایت بخشی نیز داشته است (Poli, Kennedy and Blackwell, 2007).

بهینه‌یابی عددی

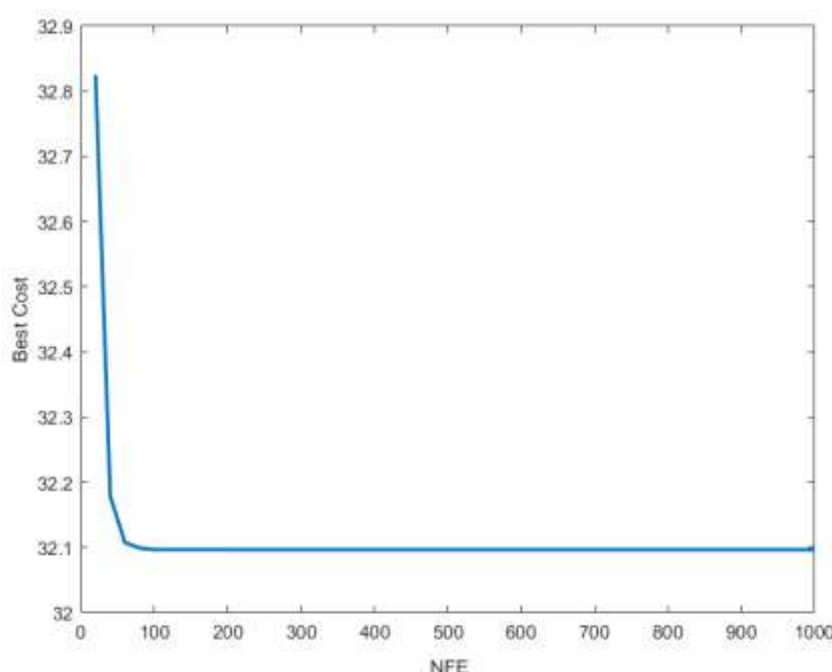
پس از بررسی و شناخت اهمیت پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه‌یابی درصد دفع‌های لاکتوز و املاح اولترافیلتراسیون شیر شتر به عنوان توابع هدف انجام شد. لازم به ذکر است در این پژوهش هدف کاهش درصد دفع لاکتوز و املاح در فرایند اولترافیلتراسیون شیر شتر بود. پارامترهای دقیق الگوریتم در جدول ۴ خلاصه شده است:

با توجه به صفات مذکور، اختلاف فشار و دمای بهینه به‌ترتیب ۸۰ کیلوپاسکال و ۲۹/۸۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمد که در چنین فرآیندی دفع لاکتوز ۳/۳۸ درصد و دفع خاکستر ۱۸/۷۰ درصد خواهد بود. همچنین مدت زمان اجرا الگوریتم و تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی در این بهینه‌یابی نیز ۰/۱۴۳ ثانیه و ۱۰۰۰ بودند. شکل ۴ نیز نمودار همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌یابی درصد دفع لاکتوز و درصد دفع املاح اولترافیلتراسیون شیر شتر را نشان می‌دهد.

جدول ٤- پارامترهای بهینه‌یابی درصد دفع لاکتوز و درصد دفع املاح اولترافیلتراسیون شیر شتر با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

Table 4- Optimization parameters of lactose and ash rejections of camel milk ultrafiltration using particle swarm algorithm

نام عامل **Factor name**	پارامترهای اولترافیلتراسیون (اختلاف فشار و دمای فرایند) **Ultrafiltration parameters (transmembrane pressure and temperature)**
تابع هدف Target function	مدل منتخب از طرح مرکب مرکزی Selected model of the central composite design (Table 2)
تعداد متغیرها Number of variables	دو متغیر Two variables ۱. اختلاف فشار در عرض غشاء Transmembrane pressure (x1) ۲. دمای فرآیند Temperature (x2)
بازه تغییر متغیرها Change interval of the variables	160-80=x_1 40-20=x_2
ماکزیمم تعداد تکرارها Maximum number of iteration (Max. Ni)	با توجه به همگرایی Due to convergence ۵۰
تعداد ذرات Number of particles (Np)	با توجه به مدل‌های موجود According to the available models 20
ضریب اینرسی Coefficient of inertia (W1)	0.5
ضریب یادگیری شخصی Personal learning factor (C1)	2
ضریب یادگیری کلی Social learning factor (C2)	2
نوع الگوریتم بهینه‌سازی Type of optimization algorithm	مبتنی بر جهش گاوسی
شرط خاتمه Ending condition	سپری شدن تعداد معینی از تکرارها بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه



شکل ٤- نمودار همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌یابی درصد دفع لاکتوز و املاح اولترافیلتراسیون شیر شتر

Fig. 4- Convergence diagram of the particle swarm algorithm in optimizing the lactose and ash rejections in camel milk ultrafiltration

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودار پس از ارزیابی حدود ۱۰۰ پاسخ به همگرایی رسیده است. بنابراین می‌توان بیان کرد که پارامترهای الگوریتم به درستی انتخاب شده‌اند و نقاط بهینه تعیین شده نیز قابل اعتماد هستند.

نتیجه‌گیری

تولید فرآورده‌های حاصل از فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر به شرط راندمان و هزینه مناسب فرآیند، بازار خوبی را برای تولیدکنندگان فراهم خواهد کرد. با توجه به اهمیت محصولات حاصل از فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر و نبود اطلاعات درمورد درصد دفع اجزاء محلول شیر شتر، در این تحقیق تاثیر دما و اختلاف فشار در عرض غشاء و برهم‌کنش آنها بر این ویژگی ها مورد بررسی قرار گرفت و این شرایط با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات بهینه گردید به طوری درصد دفع لاکتوز و درصد دفع املاح حداقل باشند. با توجه به ویژگی‌های مذکور، دما و اختلاف فشار بهینه فرآیند به‌ترتیب ۲۹/۸۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۰ کیلو پاسکال به دست آمد. از تشابه این نتایج با پژوهش‌های مشابه انجام شده بر روی شیر گاو می‌توان به‌طور کلی نتیجه گرفت که اگرچه شیر شتر از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی تفاوت‌های بسیاری با شیر گاو دارد، اما روند کلی درصد دفع اجزاء محلول آن در فرآیند اولترافیلتراسیون با شیر گاو مشابه است. نتایج بهینه یابی با الگوریتم ازدحام ذرات نیز نشان داد که این الگوریتم علاوه بر سرعت همگرایی بالا، تعداد پارامترهای اندکی برای بهبود عملکرد خود نیاز دارد به گونه‌ای که با شناخت و تحلیل پارامترهای آن به راحتی می‌توان جواب بهینه را پیدا کرد.

منابع

1. Benmechernene, Z., et al. (2014). Genomic and proteomic characterization of bacteriocin-producing leuconostoc mesenteroides strains isolated from raw camel milk in two southwest algerian arid zones. *BioMed Research International*, *2014*, 853238. https://doi.org/10.1155/2014/853238
2. Bergh, F.V.D., & Engelbrecht, A.P. (2001). *Effects of swarm size on cooperative particle swarm optimisers.* Paper presented at the Proceedings of the 3rd annual conference on genetic and evolutionary computation .
3. Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE transactions on Evolutionary Computation, 6*(1), 58-73.
4. Eberhart, R.C., Shi, Y., & Kennedy, J. (2001). *Swarm intelligence*: Elsevier .

5. Eckner, K., & Zottola, E. (1992). Partitioning of skim milk components as a function of ph, acidulant, and temperature during membrane processing. *Journal of Dairy Science, 75*(8), 2092-2097. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77967-3
6. Grandison, A.S., Youravong, W., & Lewis, M.J. (2000). Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk. *Le Lait, 80*(1), 165-174 .https://doi.org/10.1051/lait:2000116
7. Hassl, M., JØrgensen, B., & Janhøj, T. (2011). Rennet gelation properties of ultrafiltration retentates from camel milk. *Milchwissenschaft, 66*(1), 80-84 .
8. Juneja, M., & Nagar, S. (2016). *Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review.* Paper presented at the 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM) .
9. Kautake, M., Nabetani, H., & Matsuno, I. (1986). *Influence of operation parameters on permeate flux in ultrafiltration of milks, technical research institute, snow brand milk products co. Ltd*. Retrieved from
10. Kennedy, J. (1999). *Small worlds and mega-minds: Effects of neighborhood topology on particle swarm performance.* Paper presented at the Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406) .
11. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization.* Paper presented at the Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks .
12. Krstić, D. M., et al. (2002). The effect of turbulence promoter on cross-flow microfiltration of skim milk. *Journal of Membrane Science, 208*(1-2), 303-314. https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00308-3
13. Limsawat, P., & Pruksasri, S. (2010). Separation of lactose from milk by ultrafiltration. *Asian Journal of Food and Agro-Industry, 3*(2), 236-243. https://doi.org/ 10.1007/s12393-022-09330-2
14. Luo, X., Ramchandran, L., & Vasiljevic, T. (2015). Lower ultrafiltration temperature improves membrane performance and emulsifying properties of milk protein concentrates. *Dairy science & technology, 95*(1), 15-31. https://doi.org/ 10.1007/s13594-014-0192-3
15. Mehaia, M.A. (1996). Chemical composition of camel skim milk concentrated by ultrafiltration. *International Dairy Journal, 6*(7), 741-752. https://doi.org/10.1016/0958-6946(95)00063-1
16. Montgomery, D.C. (2017). *Design and analysis of experiments*: John wiley & sons .
17. Ng, K.S., et al. (2017). Mechanisms of flux decline in skim milk ultrafiltration: A review. *Journal of Membrane Science, 523*, 144-162. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.09.036
18. Olariu, S., & Zomaya, A.Y. (2005). *Handbook of bioinspired algorithms and applications*: CRC Press .
19. Poli, R., Kennedy, J & ,.Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence, 1*(1), 33-57 .
20. Pompei, C., Resmini, P., & Peri, C. (1973). Skim milk protein recovery and purification by ultrafiltration influence of temperature on permeation rate and retention. *Journal of Food Science, 38*(5), 867-870.
21. Rao, H.R. (2002). Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of ph on flux rates of whey and buttermilk. *Desalination, 144*(1-3), 319-324. https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00336-3
22. Razavi, S.M., Alghooneh, A., & Behrouzian, F. (2017). Kinetic modelling of hydraulic resistance in colloidal system ultrafltration: Effect of physiochemical and hydrodynamic parameters. *Journal of Membrane Science and Research, 3*(4), 296-302. https://doi.org/10.22079/JMSR.2017.47339.1097
23. Razavi, S.M.A., Mousavi, S.M., & Mortazavi, S.A. (2003). Dynamic prediction of milk ultrafiltration performance: A neural network approach. *Chemical Engineering Science, 58*(18), 4185-4195 . https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00301-4
24. Saltelli, A. (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk analysis, 22*(3), 579-590. https://doi.org/10.1111/0272-4332.00040
25. Shi, Y,. & Eberhart, R.C. (1998). *Parameter selection in particle swarm optimization.* Paper presented at the International conference on evolutionary programming .
26. Tenenhaus, M., et al. (2005). Pls methodology to study relationships between hedonic judgements and product characteristics. *Food Quality and Preference, 16*(4), 315-325. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2004.05.013

27. Wang, K.Y., & Chung, T.-S. (2005). The characterization of flat composite nanofiltration membranes and their applications in the separation of cephalexin. *Journal of Membrane Science*, *247*(1-2), 37-50. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.09.007
28. Yang, X.-S. (2010). *Engineering optimization: An introduction with metaheuristic applications*: John Wiley & Sons .